3П

УДК 004.382

С.А. Поливцев
Институт проблем искусственного интеллекта МОН и НАН Украины, г. Донецк
psa@iai.donetsk.ua

Метод микроанализа сигналов

В статье предлагается реализация метода микроанализа сигнала как инструмента в виде набора действий и правил действий, выполняемых над множествами объектов – полупериодов реального сигнала. Исходный сигнал представляется множеством реальных полупериодов и множеством элементарных полупериодов, являющихся декомпозицией реальных полупериодов. Реализация метода рассматривается на примере звукового сигнала от одного источника, воспринимаемого парой сенсоров (микрофонов). Приводится правило определения подобия сигналов, дается количественная оценка подобия сигналов, приводится правило определения сдвига фаз между сигналами, приводится правило восстановления реального сигнала из множества элементарных полупериодов.

Введение

Пусть звуковая волна, сгенерированная одиночным точечным источником, воспринимается микрофоном М1, усиливается усилителем У1 и преобразуется первым АЦП по закону импульсно-кодовой модуляции (ИКМ) в композитный сигнал по правилу:

$$Sig1(n, \Delta t) = k1*f1(p_0, n*\Delta t)*\cos(f2(\omega_0, n*\Delta t)), \quad (1)$$

где $k1$ – коэффициент ослабления сигнала на пути от источника до М1;

Δt – шаг квантования ИКМ;

n – номер (индекс) кванта ИКМ;

p_0 – давление звуковой волны;

ω_0 – круговая частота сигнала;

$f1$ – функция формирования амплитуды сигнала;

$f2$ – функция формирования частоты сигнала.

Пусть существуют микрофон *М2*, усилитель *У2* и *АЦП2*, физические характеристики которых совпадают с физическими характеристиками *М1*, *У1*, *АЦП1* соответственно. Пусть микрофон *М2* установлен на некотором фиксированном расстоянии от микрофона *М1*. Тогда (1) для *М2* примет вид

$$Sig2(n, \Delta t) = k2*f1(p_0, n*\Delta t)*\cos(f2(\omega_0, n*(\Delta t \pm \Delta\varphi))), \quad (2)$$

где $k2$ – коэффициент ослабления сигнала на пути от источника до М1;

$\Delta\varphi$ – угол сдвига фаз сигнала между *М1* и *М2*.

Введение $\Delta\varphi$ описывает разность путей от источника звукового сигнала (ЗС) до *М1* и *М2*. На рис. 1 показаны два подобных сигнала f1 = 697 Гц, f2 = 1209 Гц, Amp1 = = 10000, Amp2 = 5000, Δφ = 6 отсчетов, сгенерированных по формулам:

$$Sig1 := \overrightarrow{\left(Amp1\cdot\sin\left(2\cdot\pi\cdot f_1\cdot t\right) + Amp1\cdot\sin\left(2\cdot\pi\cdot f_2\cdot t\right)\right)}, \quad (3)$$

$$Sig2 := \overrightarrow{\left[800 + Amp2\cdot\sin\left[2\cdot\pi\cdot f_1\cdot\left(t+\Delta\phi\right)\right] + Amp2\cdot\sin\left[2\cdot\pi\cdot f_2\cdot\left(t+\Delta\phi\right)\right]\right]}. \quad (4)$$

На рис.1 сигнал *Sig1* показан сплошной линией, а сигнал *Sig2* показан точечной линией.

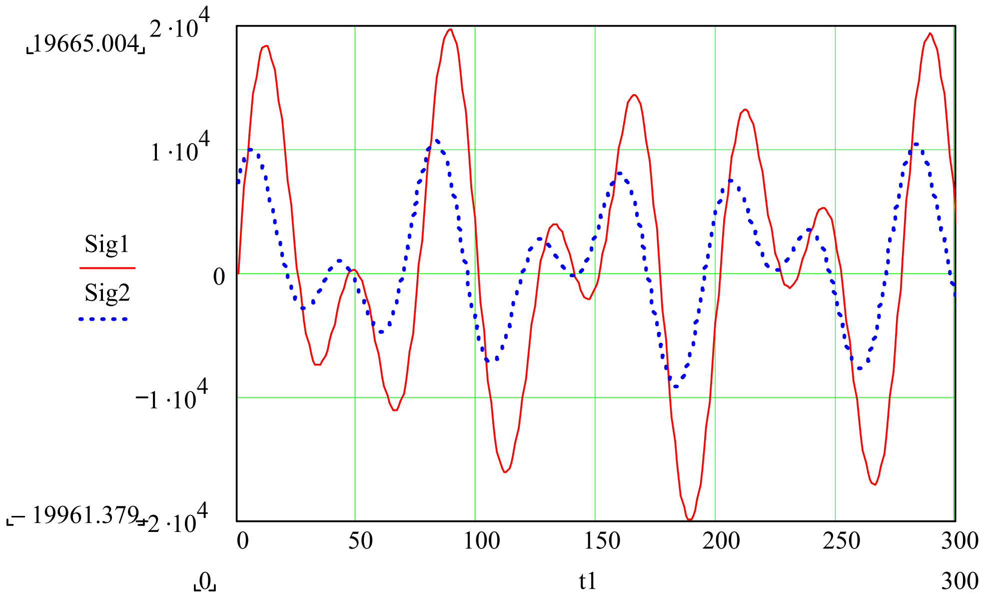


Рисунок 1 – Пример подобных сигналов для 2 частот

Пусть промежуток анализа равен 0..300 отсчетов, как на рис. 1. Использование операций построения реальных полупериодов на исходном сигнале [1], нахождение элементарных полупериодов в банке полупериодов и вычитание элементарных полупериодов из реальных полупериодов приводит к декомпозиции множеств реальных полупериодов во множества элементарных полупериодов. Или, иначе, из потоков данных, соответствующих *Sig1*, *Sig2*, извлекаются матрицы элементарных полупериодов, каждая из которых принадлежит определенному потоку данных и определенной базовой функции.

Один уровень декомпозиции входного сигнала можно описать в виде следующей последовательности действий:

– разделить входной сигнал на множество реальных полупериодов, каждый из которых отвечает условиям существования полупериодов;

– для каждого реального полупериода в банке полупериодов находится элементарный полупериод;

– для каждого из множества реальных полупериодов производится вычитание амплитуд соответствующего элементарного полупериода из амплитуд реального полупериода;

– разности амплитуд, полученные на предыдущем шаге, сливаются в один общий разностный сигнал.

Полученный разностный сигнал (по числу амплитуд в точности совпадающий с исходным) опять рассматривается как исходный для следующего уровня декомпозиции. Процесс декомпозиции продолжается до тех пор, пока в исходном сигнале возможно построение реальных полупериодов, удовлетворяющих условиям существования по времени и амплитуде, или процесс декомпозиции прекращается по достижению другого критерия. Например, все вновь полученные реальные полупериоды имеют длительность менее заданной.

Можно обозначить через *M1* множество матриц, полученных при применении метода МА к данным *Sig1*:

$$M1 = \{M1f1, M1f2, .., M1fn\}, \qquad (5)$$

где *f1*.. *fn* – множество базовых функций.

Можно обозначить через *M2* множество матриц, полученных при применении метода МА к данным *Sig2*:

$$M2 = \{M2f1, M2f2, .., M2fn\}, \tag{6}$$

где *f1.. fn* – множество базовых функций.
Множества базовых функций в (5) и (6) идентичны между собой.

Для наглядности можно привязать эти множества матриц к графикам сигналов (рис. 2).

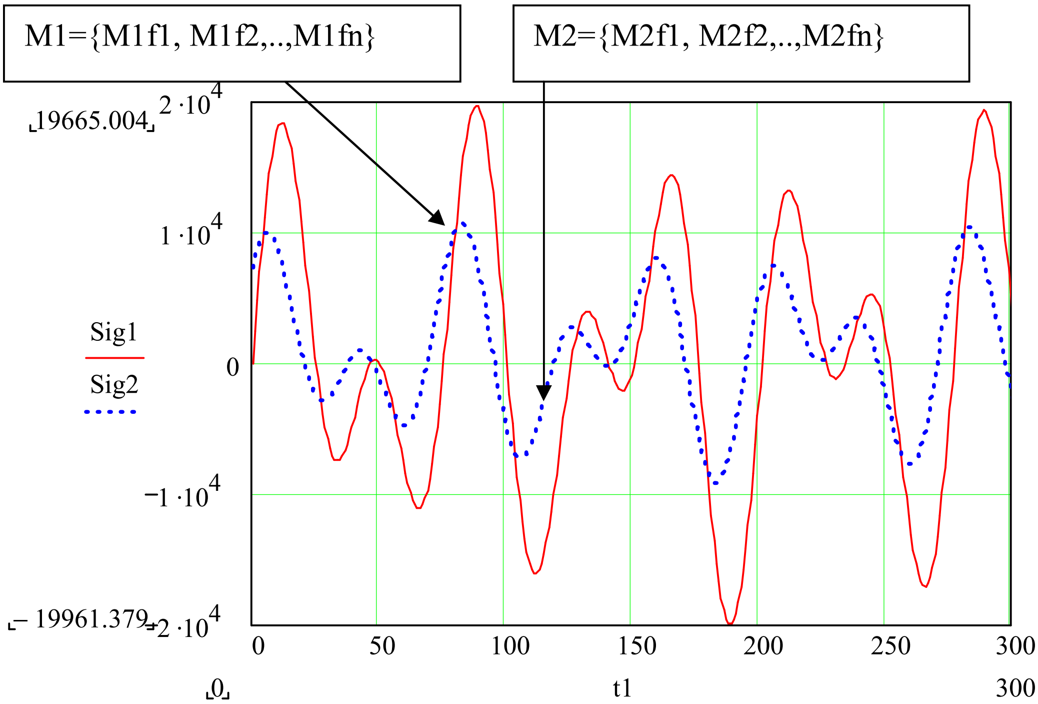


Рисунок 2 – Связь входных сигналов с матрицами элементарных полупериодов

Каждая матрица $M \in \{M1, M2\}$ – это обычная матрица, содержащая *n* строк и *m* столбцов. Каждый непустой элемент каждой строки *M* содержит описание элементарного полупериода в виде пятерки:

$$x_i = \{a0_i\ , dA_i, t0_i, dm_i, f_i\},$$

где $a0 = pr_1 x_i$ – абсолютная амплитуда начала полупериода по шкале амплитуд;

$dA = pr_2 x_i$ – длительность полупериода по шкале амплитуд;

$t0 = pr_3 x_i$ – абсолютное время начала полупериода на шкале времени (или индекс захвата АЦП);

$dm = pr_4 x_i$ – длительность полупериода по шкале времени (или число захватов АЦП);

$f = pr_5 x_i$ – вид функции полупериода.

Индекс столбца матрицы соответствует индексу времени появления элементарного полупериода в исходном сигнале. Для простоты дальнейших выкладок предполагается, что матрицы элементарных сигналов, построенные на одной и той же базовой функции, имеют одинаковое число строк, и индекс строки соответствует определенной длительности полупериода базовой функции. Соответственно число столбцов матриц одинаково в силу существования сигналов на одном и том же промежутке времени и индексы столбцов указывают на один и тот же промежуток времени. Естественно, матрицы будут сильно разреженными, и к ним в реальной программной реализации следует применять математический аппарат работы с разреженными матрицами.

В рамках этих ограничений можно говорить об операциях под сигналами *Sig1*, *Sig2* как об операциях над множествами матриц *M1*, *M2* соответственно.

Далее, для определенности, будет идти речь только о паре матриц $M1fi \in M1$ и $M2fi \in M2$, полученных на одной и той же базовой функции *fi*.

Правило определения подобия сигналов по полупериодам фиксированной длительности – определяет степень подобия сигналов по данной базовой функции, что для сигналов, разлагаемых на основе функций *sin* и *cos*, соответствует подобию сигналов на одной частоте.

Ранее оговаривалось, что каждая $M1fi \in M1$ и $M2fi \in M2$ содержат в строках *l* полупериоды одной длительности. Для фиксированных индексов строки *l* и столбца *h* ненулевые элементы *M1fi(l,h)* и *M2fi(l,h)* имеют одинаковое значение длительности *dm*. Можно говорить, что сигналы *Sig1* и *Sig2* подобны по двум элементарным полупериодам. Поскольку строки матриц содержат не один элемент и $h = (0, 1, .., m)$, то можно говорить, что сигналы *Sig1* и *Sig2* подобны по множествам элементарным полупериодам одной деятельности, если мощность множества пересечения двух строк матрицы *M1fi* и *M2fi* не пусто:

$$ECl = \left\| Sig1 \cap Sig2 \right\| \equiv \left\| M1fi\left\{l, (0,..,h,..m)\right\} \cap M2fi\left\{l, (0,..,h,..m)\right\}\right\| > 0 . \quad (7)$$

Количественная оценка подобия сигналов *Sig1* и *Sig2* для полупериодов длительности *l*, определяется подсчетом числа непустых элементов в строках *l* матриц *M1fi* и *M2fi*:

$$CM1(l) = \sum_{h=0}^{m} M1fi(l,h), \quad (8)$$

$$CM2(l) = \sum_{h=0}^{m} M2fi(l,h). \quad (9)$$

Отношения числа общих членов пересечение двух строк матрицы *M1fi* и *M2fi* к общему числу элементов в заданных строках матриц позволяют оценить относительное подобие каждого из сигналов к множеству их общих членов:

$$DE1(l) = ECl / CM1(l), \quad (10)$$

$$DE2(l) = ECl / CM2(l). \quad (11)$$

Очевидно, что значения $DE1(l) < 1$ и $DE2(l) < 1$. Можно определить степень подобия сигналов для данной длительности элементарных полупериодов как отношение:

$$CDE(l) = |DE2(l) - DE1(l)| / DE1(l). \quad (12)$$

Правило определения подобия сигналов на множестве полупериодов выполняется для всего множества строк матриц (или заданного диапазона длительностей, что эквивалентно заданному множеству строк матриц). Мощность множества пересечения для диапазона полупериодов:

$$EC = \left\| Sig1 \cap Sig2 \right\| \equiv \left\| M1fi\left\{(0,..,l,..,n)(0,..,h,..m)\right\} \cap M2fi\left\{(0,..,l,..,n)(0,..,h,..m)\right\}\right\| . \quad (13)$$

Количественная оценка подобия сигналов *Sig1* и *Sig2* в диапазоне длительностей полупериодов определяется подсчетом числа непустых элементов во всех строках матриц *M1fi* и *M2fi*:

$$CM1 = \sum_{l=0}^{n}\left(\sum_{h=0}^{m} M1fi(l,h)\right), \quad (14)$$

$$CM2 = \sum_{l=0}^{n}\left(\sum_{h=0}^{m} M2fi(l,h)\right). \quad (15)$$

Отношения числа общих членов пересечения двух строк матрицы *M1fi* и *M2fi* к общему числу элементов в заданном диапазоне строк матриц позволяют оценить относительное подобие каждого из сигналов к множеству их общих членов:

$$DE1 = EC / CM1, \quad (16)$$

$$DE2 = EC / CM2. \quad (17)$$

Очевидно, что значения $DE1(l) < 1$ и $DE2(l) < 1$. Можно определить степень подобия сигналов для диапазона длительностей элементарных полупериодов как отношение:

$$CDE = |DE2 - DE1| / DE1. \quad (18)$$

Правило определения фазового сдвига сигналов. Поскольку элементы матриц *M1* и *M2* прямо или косвенно указывают на элементарные полупериоды, то для пересечения множества полупериодов, образующих сигналы *Sig1 Sig2*, для каждого члена пересечения (13) с индексами строк *l* и столбцов *h* можно выбрать время начала полупериода и определить фазовую разницу для полупериодов как разницу:

$$\varphi 12(l,h) = pr_3\left[M1fi(l,h)\right] - pr_3\left[M2fi(l,h)\right]. \quad (19)$$

Количественная оценка фазового сдвига сигналов. Эта оценка не может быть однозначной, поскольку для полупериодов различной длительности она различна по физической природе сигнала. Однако имеет смысл получить такую оценку если не в виде одного числа, то хотя бы в виде набора чисел. Выражение (19) определяет значение сдвига фаз для пары элементарных полупериодов одной длительности двух разных сигналов. Используя значение сдвига фаз, можно рассортировать полупериоды обеих сигналов (или элементов матриц, что одно и то же) по источникам. Поскольку число элементарных полупериодов, принадлежащих каждому источнику, неизвестно и известно, что это число не может превышать число элементарных полупериодов, описываемых матрицами сигналов с сенсоров *M1* и *M2*, то следует принять, что результирующая матрица сдвигов фаз $M\varphi i$ имеет размерность, в точности совпадающую с размерностями матриц *M1* и *M2*. Более того, принимается, что элемент $M\varphi i(l,h) \equiv$ $\equiv M1fi((l,h) \equiv M2fi((l,h)$ по значениям длительности образующего полупериода и принадлежности во времени существования входного сигнала. Тогда для выбранного значения сдвига фаз φi матрица элементарных полупериодов $M\varphi i$ формируется по следующему принципу:

$$\forall (M\varphi i(l,h) \neq 0) \Rightarrow \left\{ pr_3\left[M\varphi i(l,h)\right] = pr_3\left[M1fi(l,h)\right] + \left(pr_3\left[M1fi(l,h)\right] - pr_3\left[M2fi(l,h)\right] \right) \right\}. \quad (20)$$

Выражение (20) означает, что для всех ненулевых элементов матрицы $M\varphi i$ выполняется условие, что значение начала элементарного полупериода по абсолютной шкале времени равно времени начала по абсолютной шкале времени соответствующего элементарного полупериода из матрицы *M1fi* плюс разница во времени начал соответствующих элементарных полупериодов из матриц *M1fi*, *M2fi*.

Правило восстановления сигнала *Sigi* **от источника** *i* выполняется суммированием всех полупериодов рассортированных сигналов по строкам и столбцам матрицы $M\varphi i$:

$$Sigi = \sum_{l=0}^{n} \sum_{h=0}^{m} M\varphi i\left(l,h\right). \quad (21)$$

Выводы

Рассмотрена реализация метода микроанализа сигнала как инструмента в виде набора действий и правил действий, выполняемых над множествами объектов – полупериодов реального сигнала. Исходный сигнал представляется множеством реальных полупериодов и множеством элементарных полупериодов, являющихся декомпозицией реальных полупериодов. Реализация метода рассматривается на примере звукового сигнала от одного источника, воспринимаемого парой сенсоров (микрофонов). Приводится правило определения подобия сигналов, дается количественная оценка подобия сигналов, приводится правило определения сдвига фаз между сигналами, приводится правило восстановления реального сигнала из множества элементарных полупериодов.

Литература

1. Поливцев С.А. Метод полупериодного анализа для массива микрофонов / С.А. Поливцев, В.В. Кобыляков // Искусственный интеллект. – 2006. – № 4. – С. 787-795.
2. Поливцев С.А. Многопроцессорная система реализации бинаурального слуха с массивом микрофонов / С.А. Поливцев // Искусственный интеллект. – 2009. – № 1. – С. 293-299.

С.О. Полівцев

Метод мікроанализу сигналів

У статті пропонується реалізація методу мікроанализу сигналів як інструмента у вигляді низки дій і правил дій, які виконуються щодо множини об'єктів – напівперіодів реального сигналу. Первинний сигнал – це множина напівперіодів первинного сигналу та множина елементарних напівперіодів, які є продуктом декомпозіції первинних сигналів. Реалізація методу розглядається на прикладі сигналу звуку від одного джерела, яке сприймається парою сенсорів (мікрофонів). Наводяться правила визначення подібностей сигналів, наводиться правило визначення зсуву фаз між сигналами, наводиться правило відновлення первинного сигналу з множини елементарних напівперіодів.

S.A. Polivtsev

Method of the Microanalysis of Signals

In article realization of a method of the microanalysis of a signal, as tool as a set of actions and rules of the actions which are carried out above sets of objects – half-cycles of a real signal is offered. The initial signal is represented by set of real half-cycles and set of the elementary half-cycles being decomposition of real half-cycles. Realization of a method is considered on an example of a sound signal from one source perceived in pair of sensor controls (microphones). The rule of definition of similarity of signals is resulted, the quantitative estimation of similarity of signals is given, the rule of definition of shift of phases between signals is resulted, the rule of restoration of a real signal from set of elementary half-cycles is resulted.

Статья поступила в редакцию 20.03.2009.